

量子ホール効果におけるエッジ状態と電気伝導

大阪大学大学院 理学研究科 音 賢一, 鷹岡 貞夫, 邑瀬 和生

1. はじめに

量子ホール系の電気伝導には、ホール抵抗の量子化という著しい現象以外にも、(ア) 試料の抵抗が試料サイズに比例しない[1]、(イ) 電極が試料のどこにいくつ付いているかが（測定に使わなくとも）電気伝導に影響する[2]、(ウ) 電流経路から離れた部分の電極にも電位差が生じる「非局所抵抗」が現れる[3]、など一見奇妙な振る舞いを示すことが知られている。これらは、量子ホール系における電気伝導が電気伝導度といった局所的な量だけでは決まらない非局所性を示すためと考えられ、これには試料の端に沿ったエッジ状態が重要な役割を果たしている。我々はこのエッジ状態による電気伝導について非局所抵抗や電気容量の測定を行い、整数量子ホール効果におけるエッジ状態の広がりやバルクの電気伝導度 (σ_{xx}) について研究を行ってきた[4]。特に、整数量子ホール状態での電気容量の測定から、試料端に沿って空乏層程度 ($\sim \mu\text{m}$) の幅をもつ圧縮性ストリップとみなせる電子状態（エッジチャネル）があることを実験的に検証している。一方、分数量子ホール効果においても同様なエッジチャネルがあるのか、またその構造（広がり）はどのようにになっているかという問題があり、理論・実験の両面から興味を持たれている。本稿では、電気容量の実験による分数量子ホール系でのエッジチャネルについて調べた研究を紹介する[5]。

2. 分数量子ホール効果での電気容量 「電気容量法による伝導領域の面積測定」

図1に実験で用いた試料の略図と電気容量の測定結果を示す。試料はGaAs/AlGaAsヘテロ接合の2次元電子系(2DEG)にオーミックな電極を1つ付けて2DEGをコンデンサーの一方の極板とする。また、試料表面に金を蒸着しゲート電極を作製する。この2つの電極間の電気容量は面積、間隔(100 nm)、GaAsの誘電率などの試料形状で決まる。電気容量は交流ブリッジ法で測定し、励起電圧は1 mVに抑えた[6]。ランダウ準位の占有数 ν が整数の量子ホール効果状態 ($\nu=1, 2, 3, \dots$) のみならず、 $\nu=1/3$ と $2/3$ でも電気容量が著しく減少しており低温になるほど顕著に表れている。これは、量子ホールプラトーを示す条件下でバルクの部分の伝導率 σ_{xx} が非常に小さくなり、コンデンサーの片側の電極に相当する2次元電子系の有効面積が減少するためである。ただ、このときでもエッジチャネルは伝導的なため、電気容量の極小値はエッジチャネルの面積を反映しているはずである。これを確かめるため、試料端に凹凸をつけることにより

Email: oto@phys.sci.osaka-u.ac.jp

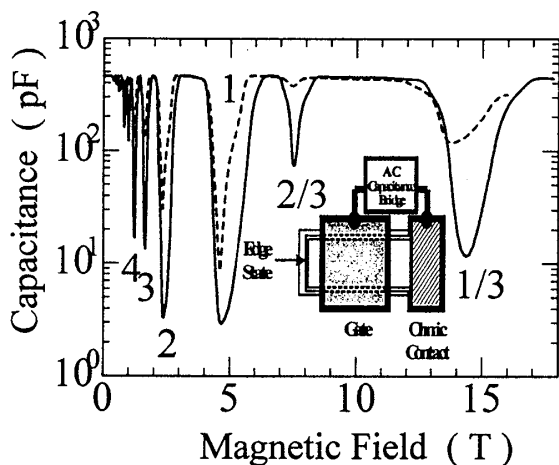


図1：ゲートと2DEG間の電気容量。整数および分数量子ホールプラトーで電気容量が極小値をとっている。分数量子ホール効果は $\nu=1/3, 2/3$ 以外にも $2/5, 3/7, 4/3$ 等のディップも見えている。内挿図は試料の略図。2次元電子系と金属ゲート間の電気容量を測定する。

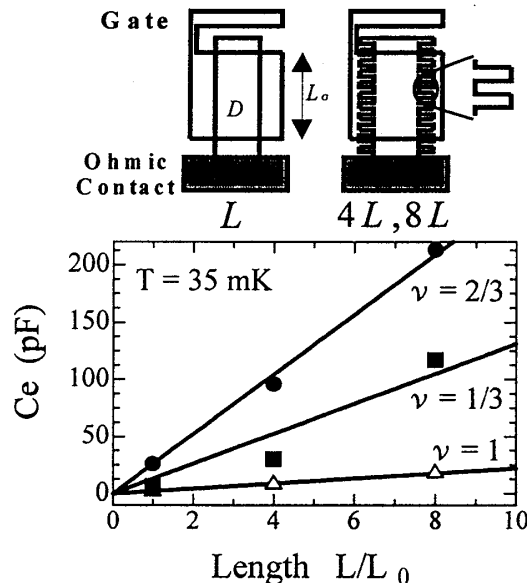


図2：(上) 試料の略図。凹凸を付けて試料の端の周囲長を変えた。(下) 各量子ホールプラトーでの電気容量の極小値。試料端の長さ按比例している。

端の長さを変えた試料を用いて電気容量の極小値を調べたところ、図2のように分数量子ホール効果でも電気容量の極小値は端の長さに正比例していた。つまり、分数量子ホールプラトーにおける電気容量の極小値は主にエッジチャネルの面積で決まり、図2の傾きからエッジチャネルの幅を見積もることができる。しかし、有限温度の実験であるためバルクの電気伝導度はゼロではなく、定量的にエッジチャネルの幅を求めるには電気容量に占めるバルクからの寄与を見積もり、差し引く必要がある。そこで、次のようなモデルを考えた。

3. エッジチャネルの幅 「電気容量の周波数依存性によるエッジ・バルクの分離」

図3は量子ホール効果での2次元電子系とゲート間の電気容量のモデルである[4, 5]。エッジチャネルを試料端に沿った金属線とみなし、オーミック電極との間に量子抵抗分のコンタクト抵抗 R_e が直列に入っているものとする。これはLandauer-Buttikerの伝導モデルで電極内での散逸を表すコンタクト抵抗に相当する。一方、バルクの2DEGを伝導度 σ_{xx} の抵抗板としこれを分布定数回路として取り扱う。実験では両者をまとめて、図3のようにエッジチャネルの寄与 C_e とバルクの寄与 C_b を足し合わせて測定していることになる。これらはコンデンサーと抵抗の複合回路となっているので、容量と抵抗成分で決まる時定数の逆数程度まで交流周波数を高くすると、測定される電気容量は小さくなる。つまり、電気容量の周波数依存性を測定して、その結果とモデルをフィットさせることにより、エッジ・バルクの寄与を分離できるとともに、

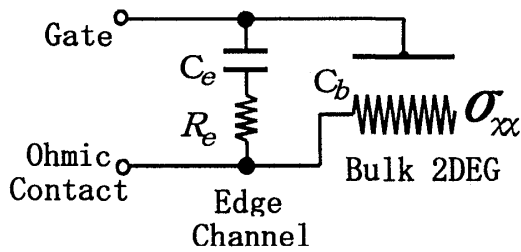


図3：量子ホール効果での電気容量測定の等価回路モデル。試料端に沿って金属帯のエッジチャンネルがある。一方、バルクは電気伝導度 σ_{xx} の抵抗板とし、抵抗とコンデンサーの分布定数回路として取り扱う。

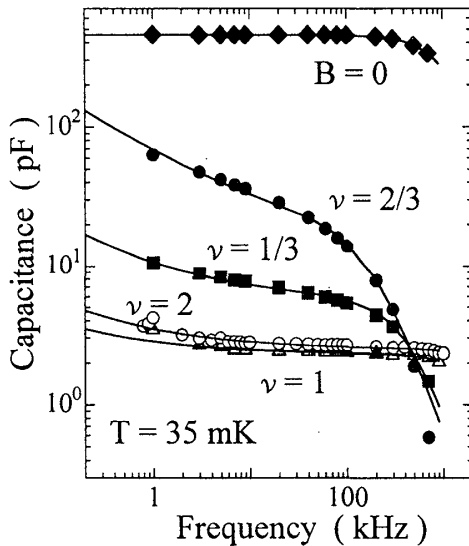


図4：量子ホールプラトーでの電気容量の周波数依存性。各点は実験値、実線は図3のモデルによる計算値を実験結果とフィットさせたもの。これよりエッジ状態の電気容量 C_e が分離でき、正確なエッジ状態の幅やバルクの電気伝導度分かる。

エッジチャンネルの電気容量 C_e 、バルクの伝導度 σ_{xx} 、コンタクト抵抗 R_e がパラメータとして得られる。

図4の点は各占有数のホールプラトーでの電気容量の極小値を周波数を変えて測定した結果で、実線はモデルを実験値にフィットさせて求めた計算値である。表1にフィッティングで得られた C_e をもとに計算したエッジ状態の幅などのパラメータを示す。コンタクト抵抗 R_e はそれぞれの量子ホール抵抗とほぼ一致しており、モデルの妥当性を支持している。また、 10^{-11} S以下の非常に小さなバルクの伝導度も測定されている。この測定で得られたエッジチャンネルの幅は整数量子ホール効果の場合と同程度の μm のオーダーで、やはり磁気長やサイクロトロン半径などの数百倍以上である。電子のスクリーニング効果（多体効果）を考慮した理論計算[7]によると、エッジチャンネルの幅は半導体の試料端の空乏層程度と報告しており、実験結果も同程度となっている。つまりこの実験では、分数量子ホール効果においても試料端に沿った（電子濃度を変えられる）圧縮性ストリップが存在し、その幅は μm 程度と整数量子ホール効果の場合と同程度であることが分かった。また、エッジチャンネルの幅とバルクの電気伝導度の温度変化を30～100 mKの範囲で調べたところ、 $\nu=1/3, 2/3$ どちらの場合でも電気伝導度は数十倍変化するにも関わらずエッジチャンネルの幅はほとんど一定で、これも整数量子ホール効果の場合と同様であった。

分数と整数の場合の違いは、実験で得られたエッジチャンネルの幅に顕著な励起電圧依存性が見られたことである[5]。図5は電気容量測定のための交流励起電圧を変えて実験して求めた、エッジチャンネルの幅 W とバルクの伝導度である。 $\nu=2/3$ の分数量子ホール効果で励起電圧が1 mV以下のとき、バルクの伝導度はほとんど変化していないが、エッジチャンネルの幅は大きく変化している。比較のため $\nu=2$ の整数量子ホール効果での測定結果も示しているが、3 mV以下

表1：電気容量の周波数依存性から求めたCe、エッジチャンネルの幅 W、バルクの電気伝導度 σ_{xx} 、エッジチャンネルのコンタクト抵抗Re。量子化抵抗値を () に示している。

占有数 (ν)	1 / 3	2 / 3	1	2
Ce (pF)	5.8	20	2.3	2.5
W (μm)	2.5	8.7	1.0	1.1
σ_{xx} (S)	1.2×10^{-11}	1.3×10^{-9}	1.4×10^{-14}	5.0×10^{-13}
Re (k Ω)	66 (77.5)	42 (38.7)	26 (25.8)	13 (12.9)

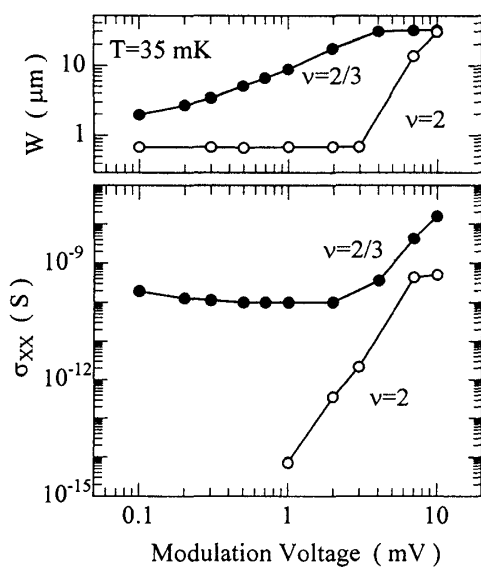


図5：エッジチャンネルの幅 W とバルクの電気伝導度 σ_{xx} の励起電圧依存性。 $\nu=2/3$ ではエッジチャンネルの幅に電圧依存性が見られる。
 σ_{xx} は 10^{-14} (S) 程度が装置の測定下限。

でエッジチャンネル幅は一定である。分数の場合に励起電圧依存性が大きくなる原因は今のところ明確ではないが、分数量子ホール効果を複合フェルミオン描像で考えたとき $\nu=2/3$ でのランダウギャップは約1 meV程度になるので、測定電圧により電子が励起されている可能性もある。ただし、実験的には励起電圧を変えてもバルクの伝導度があまり変化していないので、この励起は（あったとしても）エッジチャンネル付近だけに限られる。また、この電気容量の実験では励起交流電圧により2DEGの電子濃度をわずかに変化させたとき、それに応答する面積を測定している。励起電圧が1 mVのとき、電子濃度の変化は1/400程度とわずかであるが、分数量子ホール効果は本質的に電子の多体効果なので、整数量子ホール効果の場合と比べ電子濃度の変化に対して敏感であるとも考えられる。どちらにしても、

表1に示した分数量子ホール効果でのエッジチャンネルの幅は上限を示していると考えられ、今後さらに詳しい電圧依存性の実験を行い、励起電圧依存性の原因を調べるとともに、電圧ゼロの外挿による正しいエッジチャンネルの幅を求めたいと考えている。

本稿で紹介した実験のほか、我々は量子ホール効果のブレークダウンにおける不安定現象や、隣り合うエッジチャンネル間の電気容量測定によるエッジチャンネルの分離距離（すなわち、非圧

縮ストリップの幅) の測定を試みている。さらに、量子ホール効果でのエッジチャネルとスピン状態の関連について、斜め磁場中での測定や、Si-MOS試料との比較を行い研究を進めている。

4. まとめ

量子ホール効果でのエッジチャネルの拡がりや電気容量の測定により調べた。エッジチャネルは試料端に沿った1次元的な電子伝導路であるが、整数・分数量子ホール効果のどちらの場合でもその幅は μm の程度と1電子的な描像では説明できない大きさで、電子の多体効果を考慮した圧縮・非圧縮ストリップモデルなどの「広がったエッジチャネル」のモデルが必要である。また、電気容量の測定による分数量子ホール効果のエッジチャネルの幅には顕著な励起電圧依存性が見られた。

謝辞： 本研究に不可欠な高移動度 GaAs/AlGaAs 基板を提供して頂いた日本電気(株) 二瓶史行氏、中村和夫氏、住友電工(株) 岡田浩氏に深く感謝します。また、本研究は研究室の大学院生の新井宏一郎氏、卒業生の宇野滋雄氏、宇野重康氏らの協力と、文部省科学研究費補助金(10740170 および 09831002)ならびにCOE(10CE2004)の援助を受けて行われているものです。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] B. E. Kane, D. C. Tsui, and G. Weimann: Phys. Rev. Lett. 59 (1987) 1353.
- [2] 平井宏、小宮山進：固体物理 25 (1990) 121.
 沢崎立雄：大阪大学大学院修士論文(1993), 物性研究 60-2 (1993) 72.
- [3] P. L. McEuen, *et al.*: Phys. Rev. Lett. 64 (1990) 2062.
- [4] S. Takaoka *et al.*, Phys. Rev. Lett. 72 (1994) 3080.
 鷹岡貞夫、音賢一、邑瀬和生：固体物理 32 (1997) 506.
- [5] K. Oto, *et al.*: Physica B, 249-251 (1998) 440.
 S. Takaoka, *et al.*: Phys. Rev. Lett., 81 (1998) 4700.
- [6] 音賢一、鷹岡貞夫、邑瀬和生：固体物理 34 (1999) 185.
- [7] D. B. Chklovskii *et al.*, Phys. Rev. B46 (1992) 4026.